



1 Einleitung und Aufgabenstellung

Faserverstärkte Kunststoffe erschließen fortwährend neue Anwendungsbereiche. Prominente Einsatzbeispiele aus der Luftfahrt nach der Jahrtausendwende sind der Airbus A380 und der Boeing Dreamliner. Neben dem großindustriellen Einsatz ist die Fertigung in Faserverbundbauweise auch für Kleinserien wie bei einem Formula Student⁴ Rennsportfahrzeug oder einem Ultra-Leicht-Segelflieger (siehe Bild 1.1) interessant, da sie im manuellen Handlaminierverfahren mit überschaubarer maschineller Ausstattung möglich ist.² Der vermehrte Einsatz von faserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen ist auf ihr beachtliches Leichtbaupotenzial zurückzuführen, was bedeutet, dass sie bei einer geringen Dichte über gute mechanische Eigenschaften verfügen.

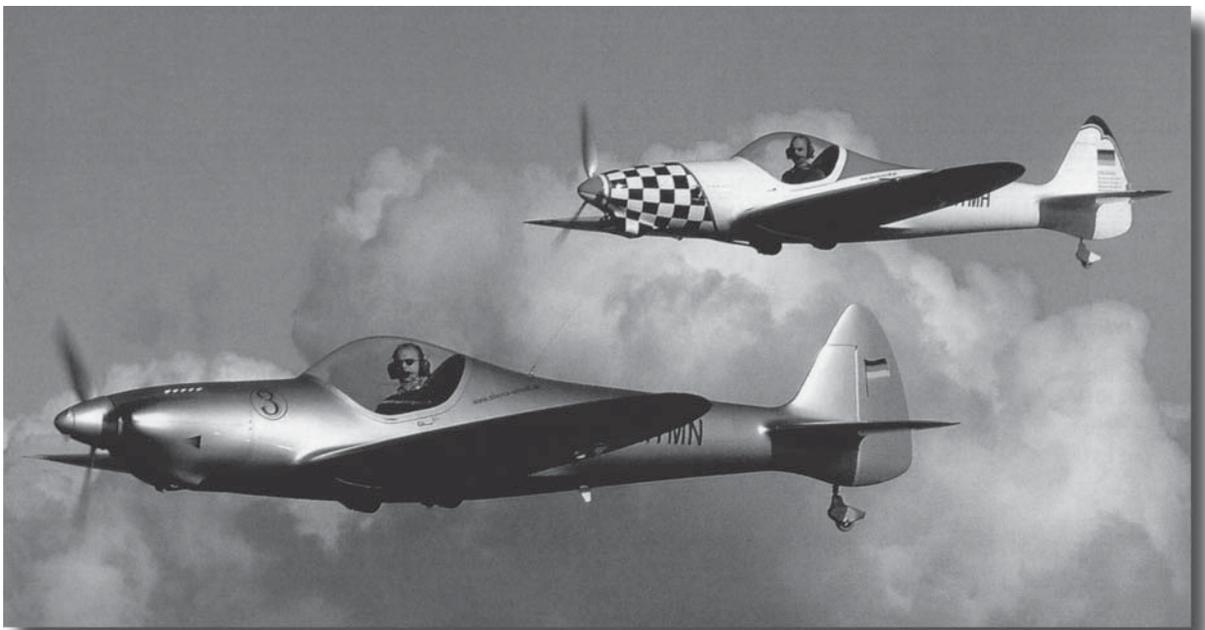


Bild 1.1: Handlamierte Ultra-Leicht-Segelflieger in Wabensandwich-Bauweise [Bildquelle: SILENCE AIRCRAFT (2011-ol)]

Als Konstruktionswerkstoff verwendet birgt der Faser-Kunststoff-Verbund jedoch eine gewisse Problematik, die gleichermaßen aus seinen Vorzügen erwächst. In diesem Zusammenhang ist einerseits das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten innerhalb des (inhomogenen) Verbundes bei mechanischer und/oder thermischer Belastung zu nennen. Andererseits bewirkt die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften, dass – bei gleichem Bauteilquerschnitt – eine Stärkung der Struktur durch gezielte Einbringung von Fasern in der vorher-

¹ Formula Student Germany: Konstruktionswettbewerb für Studenten, der seit dem Jahr 2006 vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) ausgerichtet wird

² Für die Produktion von Großserien sind Handlaminierverfahren wegen des zu geringen Materialdurchsatzes pro Stunde weniger geeignet [FLEMMING et al. (1996)].



gesagten Belastungsrichtung zu einer Schwächung derselben in den übrigen Raumrichtungen führt [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Ihr volles Potenzial schöpfen Faserverbundkunststoffe nur aus, wenn die Fasern dem jeweiligen Belastungsprofil angepasst angeordnet werden. Der Wahl der Faserorientierung kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu.

Herausforderungen und Handlungsbedarf

Vielfältige Kombinationsmöglichkeiten von Faser- und Matrixwerkstoffen sowie Variationsoptionen bei Faserablage, -orientierung, -volumenanteil und weiteren Produktkenndaten führen teilweise zu extrem unterschiedlichen Materialeigenschaften. Die inhomogenen und anisotropen Werkstoffeigenschaften bewirken in Abgrenzung zum Einsatz klassischer Konstruktionswerkstoffe, dass sich die Auslegung einer solchen Konstruktion um ein Vielfaches verkompliziert. Schließlich hängen sie nicht allein von den Ausgangsmaterialien, sondern außerdem von weiteren Parametern ab. Darüber hinaus mangelt es in vielen Fällen an Angaben über Werkstoffkennwerte für die verwendeten Komponenten der faserverstärkten Kunststoffverbunde bzw. für die Verbunde selbst [FUNKE (2001)]. Eine zusätzliche Schwierigkeit ist für den Konstrukteur bei der Bauteilauslegung auf die Tatsache zurückzuführen, dass der eigentliche Werkstoff erst mit der Formgebung des Bauteils entsteht, die produktionsspezifischen Werkstoffparameter des erstellten Verbundes (z. B. Faservolumenanteile, genaue Faserorientierung, -verteilung und -benetzung, usw.) sich also erst in dieser, dem Konstruktionsprozess nachgelagerten Produktionsstufe ergeben. Wird der Faser-Kunststoff-Verbund manuell gefertigt, stellt sich zusätzlich die Frage nach der Zuverlässigkeit und Vorhersagbarkeit des Materialverhaltens, da Imperfektionen und lokale Abweichungen eine stete Begleiterscheinung sind.

Aus den vielfältigen genannten Gründen ist eine gesamte und übersichtliche Darstellung aller Werkstoffkennwerte für Faserverbundkunststoffe nicht möglich. Folglich müssen die Materialkenngrößen streng genommen für jeden Laminataufbau experimentell bestimmt werden. Das stellt einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand dar, der nicht immer leistbar ist. Sofern keine repräsentativen experimentellen Daten vorliegen, können die Werkstoffparameter eines jeden Laminataufbaus nur rechnerisch – und ihrerseits basierend auf Prognosen – vorhergesagt werden. Als allgemeine Theorie zur Bestimmung dieser Materialparameter gilt die klassische Laminattheorie (engl.: Classical Laminate Theory, kurz: CLT). Vorgelagert finden dazu mikromechanische Homogenisierungsmodelle Anwendung, die teils empirischen Ursprungs sind. Es existieren diverse Möglichkeiten, anhand dieser Theorie Faserverbundlaminat zu berechnen. Eine davon ist das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Berechnungstool *LamiCens*[®] [FUNKE (2005b), FUNKE (2005c)], das sich bei der Vorhersage entsprechender Laminatkennwerte unter Anwendung der Berechnungsalgorithmen der CLT durch seine einfache, niederschwellige Bedienbarkeit auszeichnet. Zur Erstellung des Laminataufbaus greift *LamiCens*[®] datenbankunterstützt auf Halbzeugdaten sowie Schätzwerte zurück, die wiederum einen wesentlichen Einfluss auf die zu ermittelnden Werkstoffkennwerte nehmen. Dabei lässt sich über die Zuverlässigkeit der Halbzeugdaten schwerlich eine Aussage treffen und die Schätzwerte sind naturgemäß ungenau. Des Weiteren findet der Einfluss der Faserwellung, welche typischerweise ein Gewebe kennzeichnet, in der Software keine Berücksichtigung. Ebenso ist fraglich, inwiefern die manuelle Herstellung der Verbundwerkstoffe Einfluss auf deren mechanische Eigenschaften gegenüber der rechnerischen Prognose nimmt.



Bislang hat keine experimentelle Überprüfung der mit LamiCens[®] prognostizierten Werkstoffkennwerte für handlamierte faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe stattgefunden.

Ziele und Vorgehensweise

Motiviert durch diese Diskrepanz besteht ein wesentliches Ziel der vorliegenden Dissertation darin, die mit Hilfe des Berechnungstool LamiCens[®] ermittelten elastischen Materialparameter wie Elastizitäts- und auch Schubmoduln sowie Querkontraktionszahlen (sog. „Ingenieurkonstanten“) experimentell zu verifizieren. Dazu sollen anhand von eigens dafür manuell gefertigten (sog. handlamierten) Faserverbundkunststoffen aus handelsüblichen Glas-, Kohlenstoff-, Aramid- und Basaltfaserhalbzeugen, eingebettet in eine Kunststoffmatrix aus Epoxidharz, Experimente durchgeführt und ausgewertet werden. Bei den zu untersuchenden Faserhalbzeugen handelt es sich um stellvertretend auszuwählende Standardgewebe, die senkrecht verkreuzte Fasern aufweisen und in der Praxis häufig Verwendung finden. Für die zu Testzwecken herzustellenden Faser-Kunststoff-Laminats sind zunächst die produktionsspezifischen Kenndaten (Volumenanteile der Faser) zu ermitteln, um im Anschluss daraus Prüfkörper herzustellen. Bei der Ermittlung der Ingenieurkonstanten im realen Versuch werden optische Feldmessverfahren zum Einsatz kommen, welche sich der Methode der Photogrammetrie bedienen. Den experimentell ermittelten elastischen Kenngrößen werden dann zu Vergleichszwecken die Vorhersagen aus Berechnungen mit LamiCens[®] unter Berücksichtigung im Labor bestimmter Eingangsdaten zur Charakteristik des jeweiligen Probelaminats (z. B. Faservolumenanteil) gegenübergestellt. Die generierte Datenbasis soll Anwendern der hier getesteten faserverstärkten Epoxidharze als Anhaltspunkt für die Güte eines manuell gefertigten Laminats dienen. Man erhofft sich am Ende dieser Arbeit Aussagen über geeignete Korrekturfaktoren zu den exemplarisch untersuchten Werkstoffkonstellationen.

Da sich der Herstellungsprozess – etwa eines Schalenbauteils aus Faserverbundkunststoff – erheblich von dem einer Metallkonstruktion unterscheidet, außerdem in Bezug auf die Bauteilgeometrie bei einer Faserverbundkonstruktion bestimmte Regeln zu beachten sind und die Werkstoffauslegung komplizierter ist, stellt die Einarbeitung in die Thematik eine große Hürde dar. MICHAELI et al. (1995) beschreiben diese Problematik als „zwischen ‚Anfänger- und Spezialistenliteratur‘ klaffende inhaltliche Lücke“. Wie führt man aber nun den wissenschaftlichen Nachwuchs an eine solch komplexe Thematik heran? Aus diesem Grund ist Wissensvermittlung ein weiteres zentrales Thema dieser Abhandlung. Es gilt, dem (angehenden) Konstrukteur mittels der universitären Ausbildung zunächst ein Gefühl für die doch ungewöhnlichen Vor- und Nachteile und damit verbundenen Möglichkeiten und Einschränkungen beim Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden in Bauteilen zu vermitteln. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Lernumgebung namens „E-MechLAB“ soll hier einen Ansatz liefern, um den schwierigen Einstieg zu erleichtern und evtl. als Nachschlagewerk zur Vertiefung für mechanische Fragestellungen zu dienen.

Struktureller Aufbau der vorliegenden Arbeit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich diese Dissertation handlamierten Faserverbundkunststoffen widmet und versucht, deren Eigenschaften zu quantifizieren und zwar sowohl experimentell in Abhängigkeit der Faserorientierung, als auch theoretisch und – auf-



grund der Komplexität der Thematik – die Ergebnisse in einer ansprechenden Lernumgebung für den Anwender aufzubereiten. Daraus ergibt sich der Aufbau dieser Arbeit, der grundsätzlich, wie in Bild 1.2 veranschaulicht, durch die folgenden drei Säulen charakterisiert wird:

- Säule 1: Die Anwendung neuer experimenteller Methoden optischer Feldmessverfahren (Photogrammetrie) auf faserverstärkte Kunststoffe.
- Säule 2: Die Theorie zum Labor mittels Einführung in die Laminattheorie und Vergleich mit den Resultaten aus der ersten Säule.
- Säule 3: Der Transfer dieses komplexen Werkstoffwissens in die Lehre durch die Einbettung der ersten und zweiten Säule in eine mit virtuellen Laboren angereicherte Fachwissensbasis für einen Adressatenkreis von Studenten, Anwendern, im Beruf stehenden Personen, die sich ein neues Wissensgebiet erschließen wollen, und weiterem interessiertem Publikum, sei es schulisch oder beruflich motiviert.

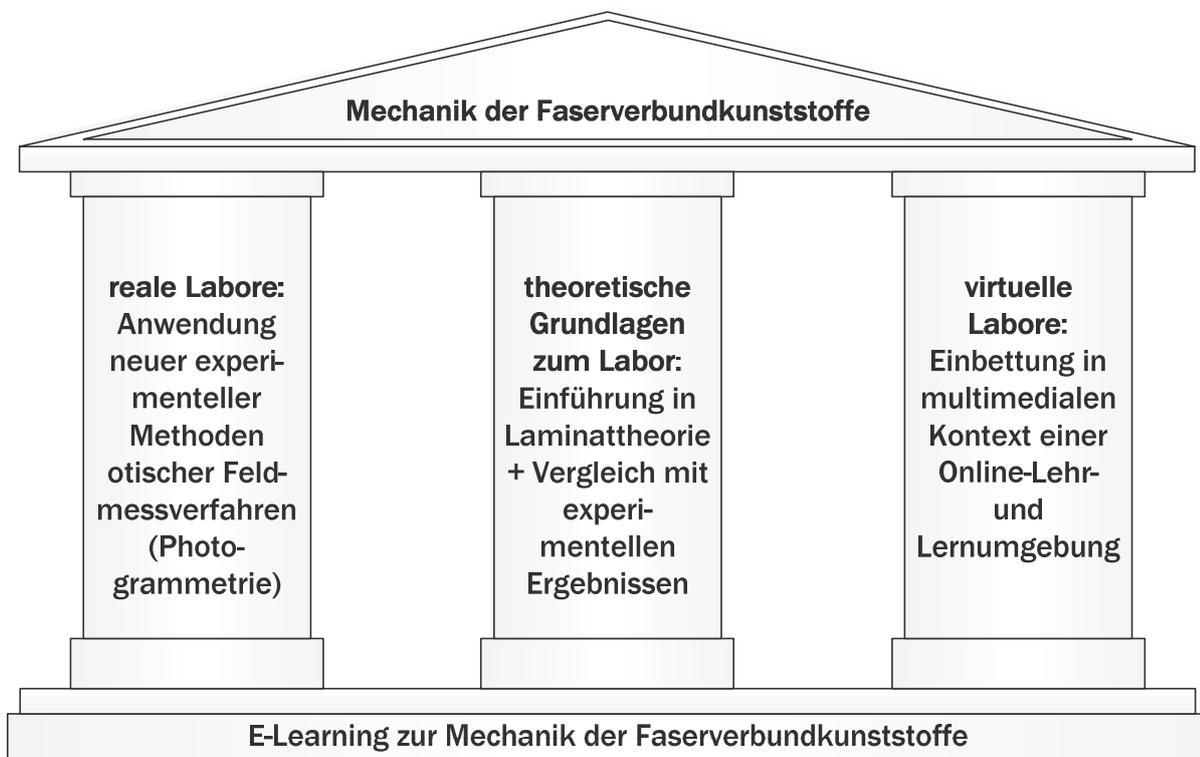


Bild 1.2: Die drei Säulen der Umsetzung realer und virtueller Labore zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe



2 Mechanik und reale Labore

– Experimentelle Bestimmung elastischer Materialeigenschaften faserverstärkter Kunststoffverbundwerkstoffe unter Einsatz optischer Feldmessverfahren

Für den Konstrukteur stellt gemäß MICHAELI et al. (1995) die Vielzahl der zu determinierenden Eingangskenngrößen, die allesamt entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des späteren Werkstoffes haben, eine sehr unübersichtliche und nahezu unlösbare Aufgabe bei der optimalen Auslegung eines Faserverbundkunststoff-Laminats dar. Die Werkstoffauswahl ist zu treffen, der Faservolumenanteil ist zu schätzen, die Orientierungswinkel der Einzelschicht müssen möglichst belastungsgerecht prognostiziert werden, über gewünschte Schichtdicken sind Annahmen zu treffen und Stapelfolgen sind festzulegen. In der Hochschullandschaft finden sich dafür komplexe numerische Optimierungsprogramme (vgl. z. B. KNEPPE (1986)). Die Luft- und Raumfahrt setzt ebenfalls solche Programme ein. Schon 1995 bemerkten MICHAELI et al. (1995), dass „kommerzielle Programmentwicklungen zur FVK-Optimierung... noch in den Kinderschuhen“ stecken. Daran hat sich bis heute leider wenig geändert.

Die erwähnten, zahlreichen Parameter, die in den konstruktiven Prozess einfließen, sind relativ unsicher. MICHAELI et al. (1995) betonen daher, „dass in Versuchen ermittelte Einzelschichteigenschaften immer die ‚besseren‘ Kennwerte für eine Dimensionierung sind“, da sie die Realität exakter abbilden, als eine theoretische Prognose aus einer Simulation. NIEDERSTADT et al. (1985) erörtern ausführlich, dass ein Bauteil aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (kurz: CFK) von vornherein mit mehr „Fehlern“ behaftet ist als ein vergleichbares Metallteil, was schlichtweg darauf zurückzuführen ist, dass hier zwei Komponenten zu einem Werkstoff zusammengesetzt werden, die hinsichtlich ihrer Form, ihrer mechanischen Eigenschaften wie auch ihrer chemischen Konsistenz völlig unterschiedlich sind. Material- bzw. Verarbeitungsfehler (Bereiche mit zuviel oder zuwenig Harz, Gasblasen oder Fremdkörper einschüsse, fehlerhafte oder falsch orientierte bzw. verrutschte Faserlagen, unvollständige Vernetzung, zu hohe Feuchtigkeitsaufnahme) dürfen ein gewisses Maß, das als tolerabel erachtet wird, nicht überschreiten. Durch gezielte Qualitätssicherung kann bestimmten Schäden bereits im Vorfeld der Fertigung durch gewissenhafte Wareneingangskontrolle, Überwachung der Lager- und Werkstattbedingungen sowie bei der Herstellung weitestgehend vorgebeugt werden. Gänzlich auszuschließen sind diese Defekte jedoch nicht.

Beim Aushärtungsprozess kommen entstehende Risse hinzu. Wird das Bauteil belastet, so vergrößern und vermehren sich diese Defekte im allgemeinen stetig; es treten weitere Risse auf, die gegebenenfalls von Delaminationen zwischen den einzelnen Faserlagen sowie Faserbrüchen oder Faser-Harz-Ablösungen begleitet werden. Das Ausmaß der Schädigung kann mit zerstörungsfreien Prüfmethoden bestimmt werden, z. B. Röntgenprüftechnik, Ultraschall-Prüftechnik, Schallemissionsanalyse, Rasterreflexionsverfahren, holografische Interferometrie, Wärmefluss-Thermografie, Abklopffverfahren, um Aussagen zur Bauteilzuverlässigkeit bei weiterer Belastung treffen zu können. Wenn das Bauteil „gut“ konstruiert ist und es nicht in unvorhergesehener Weise belastet wird, sollten nach NIEDERSTADT et al. (1985) alle festgestellten Defekte unterkritisch sein.



Wird das Faktum der fehlerbehafteten Bauteile darüber hinaus um den Umstand ergänzt, dass der Verbundwerkstoff im Handlaminierverfahren – also **manuell** – hergestellt wurde, so steigert das nicht das gefühlte Vertrauen in die Werkstoffkategorie der faserverstärkten Kunststoffe. Mithin stellt sich die Frage: Wie „gut“ sind solche handlaminierten Faserverbundkunststoffe wirklich? Zumal das manuelle Herstellungsverfahren gar nicht so selten zum Einsatz kommt, wie Bild 2.1 mit dem Vergleich unterschiedlicher Verarbeitungsverfahren für glasfaserverstärkte Kunststoffe bezüglich ihrer Jahresproduktion in Europa im Jahr 2005 belegt. Im Gegenteil, hieraus wird deutlich, dass die manuelle Herstellung von Glasfaserverbundkunststoffen im Handlaminierverfahren eine Vorrangstellung vor den maschinellen Verfahren einnimmt. Neben automatisierten Herstellungsverfahren, die insbesondere bei der Großserienfertigung zum Tragen kommen, eignet sich das Handlaminierverfahren (vgl. Abschnitt 2.4) ideal zur Herstellung kleiner Stückzahlen von FKV-Bauteilen, Prototypen oder auch sehr großen Bauteilen. Es ist außerdem sehr flexibel und investitionsarm in Bezug auf benötigte Werkzeuge und Verarbeitungsmittel [EHRENSTEIN (2006)]. Jedoch ist zu erwähnen, dass die Qualität im Handlaminierverfahren vom Können und der Erfahrung des Laminierers abhängt.

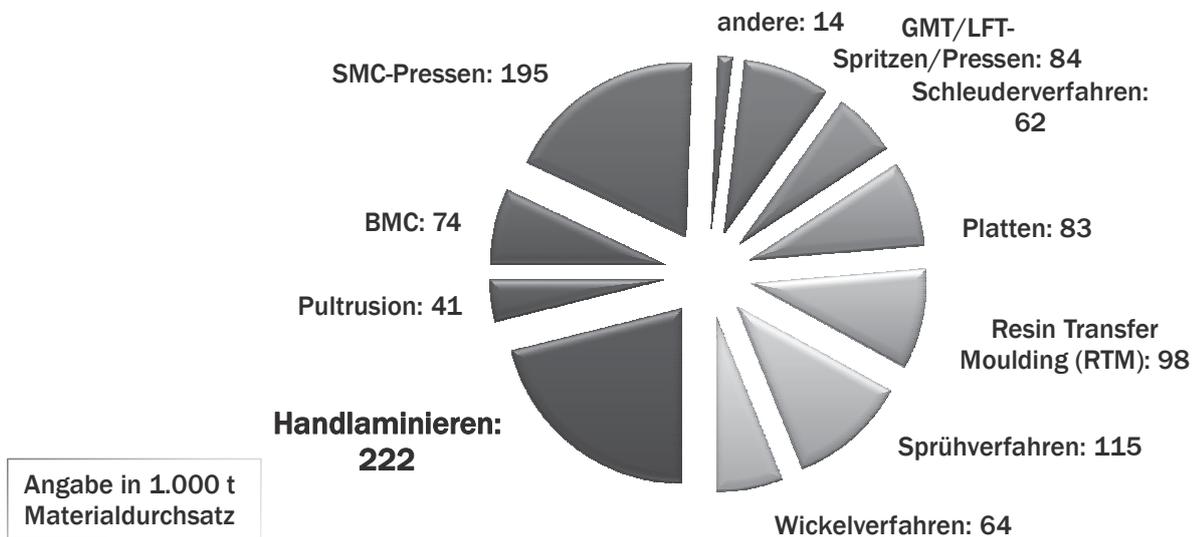


Bild 2.1: GFK-Verarbeitungsverfahren in Europa 2005 [Bildquelle: nach EHRENSTEIN (2006)]

Der Frage nach dem Einfluss der manuellen Werkstoffherstellung soll im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe optischer und damit berührungsloser Messtechnik zur Verformungserfassung nachgegangen werden. Dazu werden zunächst die Werkstoffe vorgestellt, deren Herstellung und die der Prüfkörper erörtert, auf die Prüftechnik (Prüfstand und eingesetzte Sensoren) eingegangen und anschließend die experimentellen Ergebnisse präsentiert, die dann im nächsten Kapitel der Theorie gegenübergestellt werden. Die Abschätzung des Versuchsprogramms auf Grundlage der klassischen Laminattheorie bzw. vor kontinuumsmechanischem Hintergrund ist ausführlich in Kapitel 3 dargestellt. Die erarbeitete Wissensbasis wird darüber hinaus wie in Kapitel 4 beschrieben für die Online-Lehre aufbereitet und so einem breiten Publikum zugänglich gemacht.



2.1 Wissenswertes über faserverstärkte Kunststoffverbunde

Faserverstärkte Kunststoffverbunde bestehen aus zwei Komponenten: dünnen Fasern und einer umgebenden Matrix. Die Verstärkungswirkung kann dabei allgemein als „*Erhöhen der Festigkeit eines Grundwerkstoffes durch Einbetten von Verstärkungsmaterial*“ [SCHÜRMAN (2007)] definiert werden. Dieses Konstruktionsprinzip ist keinesfalls neu. Faserverbundbauweisen treten in der Natur bereits seit Millionen von Jahren auf. So gehört der Faserverbundwerkstoff Holz zu den ältesten Konstruktionswerkstoffen des Menschen. Die neue Werkstoffgruppe der duroplastischen Faserverbundwerkstoffe wurde vor ca. 70 Jahren entdeckt, als die Fa. United Rubber Company 1942 eine erhebliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von ungesättigten Polyesterharzen durch Verstärkung mit Glasfasern herausfand, vgl. dazu FLEMMING et al. (1999), DOMININGHAUS (1992). Die Entdeckung fußt auf mehreren Meilensteinen. Einer davon war 1912 mit der Herstellung endloser Glasfasern mit entsprechenden mechanischen und chemischen Eigenschaften gelegt [LANGHORST (1993)]. Dann glückte in den dreißiger Jahren die Entwicklung duroplastischer, also härtpbarer Matrixsysteme, die auch allgemeinhin unter dem Namen Harze bekannt sind. In mehreren Etappen wurden seitdem die Vernetzungsreaktionen von Polyesterharzen wie auch die Reaktionsfreudigkeit der Epoxidharzgruppe genutzt und verbessert, sodass letztgenannte ohne Abspaltung von Nebenprodukten aushärten und Endprodukte mit hervorragenden Eigenschaften bei geringem Schwund entstehen [FLEMMING et al. (1999)].

Die Fasern übernehmen den größten Teil der mechanischen Belastungen im Verbund. Häufig kommen Verstärkungsfasern aus **Glas**, **Aramid** oder **Kohlenstoff** zum Einsatz, die im Rahmen dieser Arbeit neben **Basaltfasern** untersucht werden. Diesen modernen Industriefasern werden sehr gute mechanische Eigenschaften nachgesagt. Die Fasern liegen gewöhnlich in Form von flächigen oder räumlichen Halbzeugen vor. Sie werden in eine sogenannte Matrix aus Kunststoff (z. B. Thermoplaste oder in unserem Fall Duroplaste) eingebettet. Für stark beanspruchte Bauteile werden SCHÜRMAN (2007) zufolge vorwiegend Epoxidharze verwendet, wie auch in den dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchen. Der schematischen Darstellung in Bild 2.2 ist zu entnehmen, dass der Faserverbundkunststoff bei der Einbettung der Fasern in den Matrixwerkstoff – in der gewünschten Stapelfolge – und ggf. durch Verpressen sowie anschließende Aushärtung entsteht. Die Fasern sind dabei zumeist in Faserbündeln, sogenannten Rovings, zusammengefasst. Diese Rovings liegen parallel zueinander³ und formen mit der umgebenden Matrix eine Einzelschicht. Ist der Faserverbundwerkstoff schichtweise aus mehreren mit Matrixwerkstoff durchtränkten Halbzeuglagen übereinander aufgebaut, so wird der Verbund als Laminat bezeichnet. Die Bezeichnung Laminat ist vom lateinischen Wort lamina („Schicht“) abgeleitet. Innerhalb des Laminats sind die Einzelschichten häufig gegeneinander verdreht angeordnet, damit die höherfesten Fasern Lasten in verschiedenen Richtungen aufnehmen können. Faserverbundlaminat werden entsprechend der Ausrichtung ihrer Fasern in unidirektional (UD), bidirektional (BD) und multidirektional (MD) unterschieden.

³ Die parallele Anordnung ist eine Prämisse für die Theorie: In der Praxis mag es (marginale) Abweichungen in Abhängigkeit vom verwendeten textilen Flächengebilde (siehe Abschnitt 2.2.6) geben. Oftmals werden Gelege, Gewebe oder Geflechte verwendet. In diesen Faseranordnungen liegen die Fasern bereits in orthogonalen Schichten ineinander.

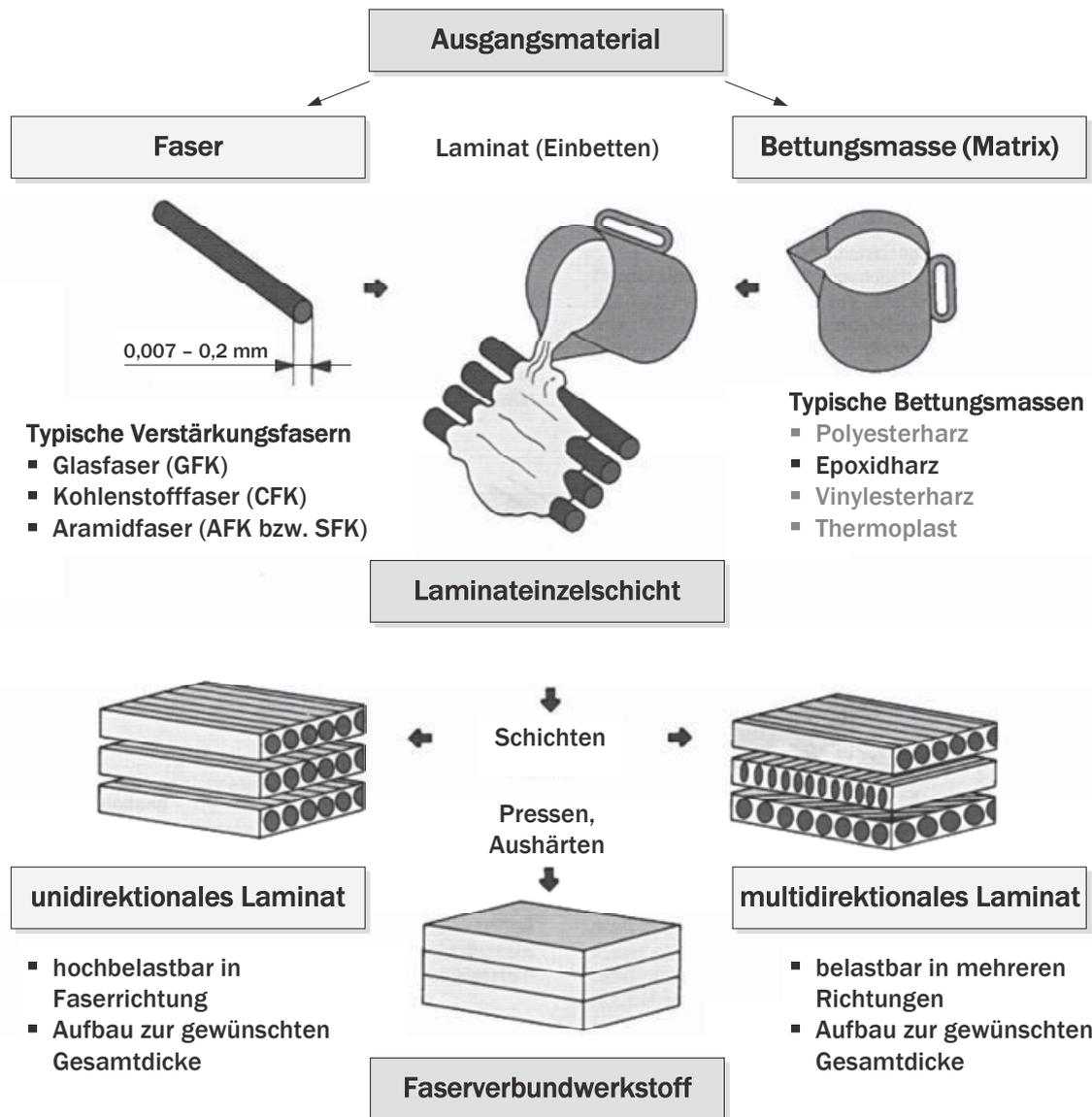


Bild 2.2: Aufbau von Faserverbundkunststoffen [Bildquelle: nach DLR Stuttgart, veröffentlicht in: R&G (2003)]

Ein entscheidender Vorteil dieser Art des Werkstoffs ist die relativ einfache Verarbeitung, die mit geringem Investitionsaufwand sogar in einer Hobbywerkstatt möglich ist. Für den so entstandenen Werkstoffverbund finden sich in der Literatur verschiedene Bezeichnungen wie faserverstärkter Kunststoff, Faserverbundkunststoff (FVK) oder Faser-Kunststoff-Verbund (FKV). Weiterhin wird auch der englische Begriff „Composite“ synonym verwendet. Die allgemeine Bezeichnung faserverstärkter Kunststoff kann durch Einsetzen des konkret verwendeten Faserwerkstoffs präzisiert werden. So wird für einen glasfaserverstärkten Kunststoff die gängige Abkürzung GFK verwendet. Analog existieren die Bezeichnungen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK), basaltfaserverstärkter Kunststoff (BFK) und aramidfaserverstärkter Kunststoff (AFK). Letzterer wird gelegentlich auch als synthesefaserverstärkter Kunststoff (SFK) bezeichnet. Dieser Begriff ist dann jedoch weiter gefasst und schließt auch Polyethylen- und Polyamidfasern (ebenfalls Synthefasern) mit ein. In Bezug auf die Abkürzung BFK gilt es, Vorsicht walten zu lassen, da diese stellenweise auch für borfaserverstärkte Kunststoffe verwendet wird.

Aus der Kombination der beiden Komponenten Faser und Matrix ergeben sich im Wesentlichen zwei grundlegende Eigenschaften, die Faserverbundkunststoffe von anderen Konstruktionswerkstoffen wie beispielsweise Stahl unterscheiden: sie sind **inhomogen** und **anisotrop** (siehe auch Abschnitt 3.3). Unter Inhomogenität versteht man, dass die Materialeigenschaften eines Werkstoffes vom Ort abhängen. Eine dieser Werkstoffeigenschaften ist die Steifigkeit, welche dort, wo sich Fasern befinden, deutlich höher ist als an Stellen mit Harz. Anisotropie bedeutet Richtungsabhängigkeit. Allgemein gilt für Faserverbundkunststoffe, dass die Steifigkeit in Faserrichtung deutlich höher ist als die Steifigkeit quer dazu. Aus diesen beiden wesentlichen Merkmalen ergeben sich gravierende Unterschiede gegenüber der Berechnung herkömmlicher Werkstoffe wie Stahl.

2.1.1 Einsatz von faserverstärkten Kunststoffverbunden unter Leichtbaugesichtspunkten

Faserverbundkunststoffen wird „enormes Leichtbaupotenzial“ nachgesagt. Sie weisen laut MICHAELI et al. (1995) „*hervorragende mechanische Eigenschaften*“ auf und übertrumpfen die klassischen Konstruktionswerkstoffe wie Stahl und Aluminium aufgrund ihrer geringen Dichte mit „*sehr hohen gewichtsbezogenen Festigkeiten und Steifigkeiten*“, was aus dem Vergleich in Bild 2.3 hervorgeht. Im linken Diagramm ist die Zugfestigkeit über dem E-Modul aufgetragen, rechts sind diese Kennzahlen normiert auf die jeweilige Werkstoffdichte dargestellt. Zur Schonung von Ressourcen werden FVK daher bevorzugt für Leichtbaukonstruktionen, also überall dort, wo hohe Festigkeiten bei geringer Masse gefordert sind, eingesetzt.

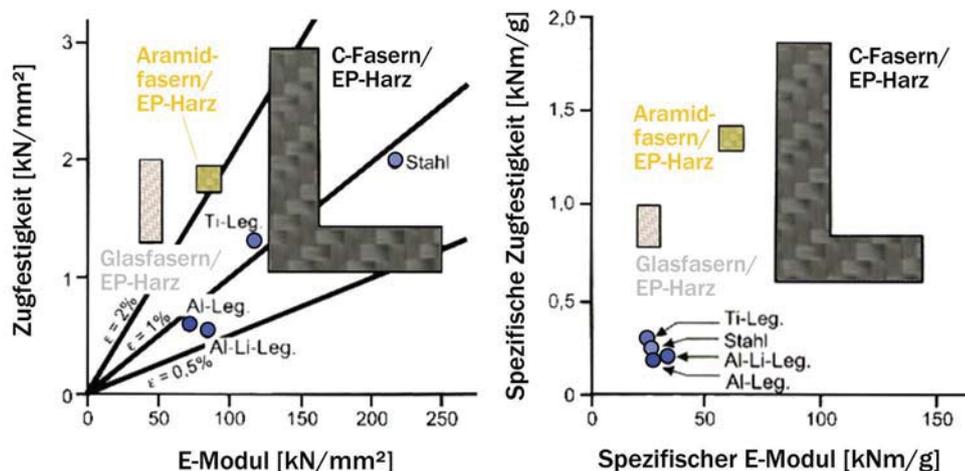


Bild 2.3: Vergleich absoluter (links) und spezifischer Materialeigenschaften von unidirektionalen Hochleistungsverbund-Kunststoffen mit hochfesten Metallen [Bildquelle: EHRENSTEIN (2006), geringfügig modifiziert]

Diese herausragenden Eigenschaften liegen jedoch im Wesentlichen in Faserrichtung vor, was MICHAELI et al. (1995) eindrucksvoll in Bild 2.4 mit der Gegenüberstellung von unidirektionalen gegenüber quasi-isotropen FVK-Laminaten veranschaulichen. Es wird deutlich, dass sich der gewichtsbezogene Vorteil gegenüber Metallen relativiert, wenn die Konstruktion nicht lastgerecht optimiert wurde. FVK sind nach WIEDEMANN (1996) wegen ihres Leichtbaupotenzials prädestiniert für den Fahrzeugbau, die Luft- und Raumfahrt oder den Maschi-



nenbau. Für EHRENSTEIN (2006) sprechen aus Sicht von Unternehmen die zwei Schlüsselfaktoren Festigkeit und geringe Masse für den Einsatz von FVK, gefolgt von der Medienbeständigkeit und Steifigkeit. Zu beachten ist aber auch, dass man mit der Entscheidung für FVK in Bezug auf die Bauteilanforderungen flexibler ist, da sie über „eine in weiten Grenzen einstellbare Steifigkeit, die von sehr hoher Steifigkeit bis zu hervorragender Dehnbarkeit reicht“, verfügen [MICHAELI/WEGENER (1990)].

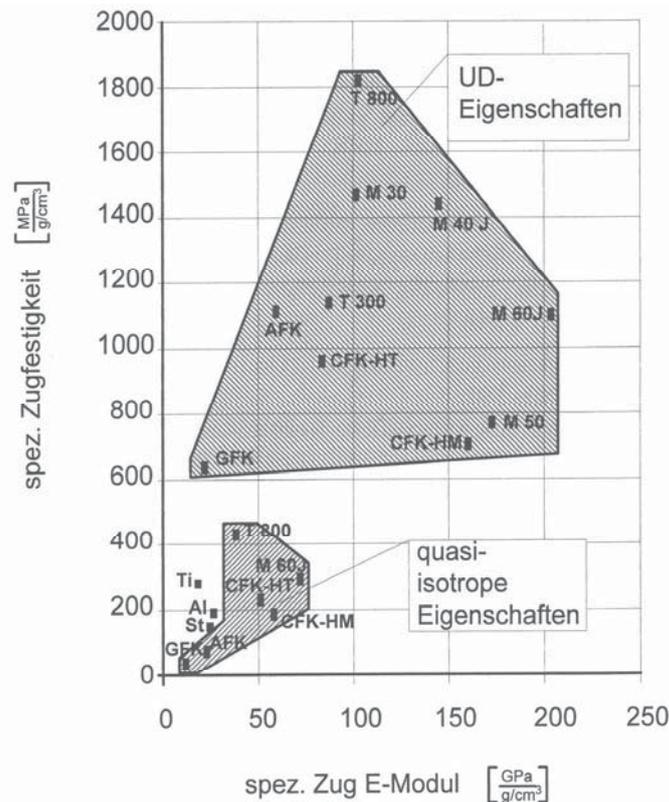


Bild 2.4: Spezifische Eigenschaften von unidirektional und quasi-isotrop verstärkten Faser-verbundkunststoff-Laminaten gegenüber denen von Metallen [Bildquelle: MICHAELI et al. (1995)]

2.1.2 Werkstoffe mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften

In Bezug auf die gezielte Einstellung bestimmter gewünschter Eigenschaften wird bei Faser-verbundwerkstoffen auch von maßgeschneiderten bzw. designbaren Werkstoffen gesprochen. Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Faserhalbzeuge zu wählen, zu kombinieren und darüber hinaus die Fasern belastungsgerecht im Bauteil zu positionieren. Das hängt mit der Besonderheit des Faserverbundwerkstoffs, der Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften (Anisotropie), zusammen. Die Fasern können je nach Belastung des Bauteils ausgerichtet werden: In Richtung der Fasern können Faserverbund-Bauteile hohe Kräfte aufnehmen, während sie einer Belastung außerhalb der Faserrichtung weniger gut Stand halten. Die Tatsache, dass nicht nur mit dem Werkstoff konstruiert wird, sondern auch der Werkstoff selbst entsprechend den gewünschten Anforderungen erschaffen wird, eröffnet viele Gestaltungsmöglichkeiten [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Konstruktionen aus Faserverbundkunststoffen haben den Vorteil, dass sie durch die Wahl der geeigneten Fasern und deren Ausrichtung sowie Lagenstärke, in Verbindung mit einem entsprechenden Matrixmaterial, nahezu



ideal auf die zu erwartenden Belastungen im konkreten Anwendungsfall abgestimmt werden können. Besonders beanspruchte Stellen können gezielt verstärkt werden, so dass die mit einer Verstärkung verbundene Gewichtszunahme auf ein Minimum reduziert werden kann. Die Fasern sind dabei ähnlich wie bei Pflanzen angeordnet: An höherbelasteten Stellen werden mehr Fasern genau in Krafrichtung angeordnet. Aufgrund der erwähnten Anisotropie sind Kenntnisse über die Gestaltung und Dimensionierung von FKV-Bauteilen unbedingt erforderlich. Mit der optimalen Nutzung dieses Leichtbaupotenzials beschäftigt sich das Textilverfahren Tailored Fibre Placement (TFP) (siehe z. B. SPICKENHEUER (2008)).

2.1.3 Zusammenspiel von Faser und Matrix im Verbund

„In einem Composite-Material kann die Verbundstruktur als Ganzes Spannungen ertragen, die die schwächere zerschneiden würde, während von der stärksten Komponente ein viel höherer Prozentsatz der theoretischen Festigkeit realisiert werden kann, als wenn sie allein beansprucht würde.“ [SLAYTER (1962)]

Dieses – der Aufzählung von VAN KREVELEN (1983) zufolge – „vierte Paradoxon“ beschreibt das bemerkenswerte Zusammenwirken von Faser und Matrix im Verbund und wurde ursprünglich für Zwei-Phasensysteme formuliert [FLEMMING/ROTH (2003)].

Um die mechanischen Werkstoffeigenschaften der Fasern nutzen zu können, werden diese in eine Matrix eingebettet, wie in Bild 2.2 veranschaulicht. Es liegt eine gewisse Aufgabenteilung in dieser Symbiose. FLEMMING et al. (1999) kritisieren die „*weitverbreitete Meinung, die Harze dienen nur als ‚Klebstoff‘ für die Verstärkungsfasern*“, wohingegen die Fasern die eigenschaftsbestimmende Komponente des Verbundes seien. Vielmehr sei die Abstimmung des Harzsystems auf die Fasern essentiell, um einen leistungsfähigen Komposit zu erzeugen.

Die Fasern bilden zwar die verstärkende Komponente im Verbund, jedoch könnte ein spröder Werkstoff wie Glas nicht alleine für Bauteilkonstruktionen eingesetzt werden [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Wie in den meisten Fällen üblich, werden auch die zur Herstellung der Zugproben verwendeten Fasern vollständig in eine Kunststoffmatrix eingebettet. Dies hat zur Folge, dass die Fasern nicht mehr direkt belastet werden, sondern die Kräfte über die Matrix auf sie übertragen werden. Der Krafteinleitung kommt somit eine wichtige Bedeutung zu [RÖSLER et al. (2006)]. Insbesondere bei einer Belastung des Werkstoffs quer zur Faserrichtung spielt die Haftung zwischen Faser und Matrix eine entscheidende Rolle.

Die Aufgaben des Harzsystems im Verbund können wie folgt beschrieben werden [SCHÜR-MANN (2007)]:

- Fixierung der Fasern in einer vorgesehenen Orientierung,
- Erzeugung einer Distanz zwischen den scheuerempfindlichen Fasern,
- Schutz der Fasern vor Umgebungseinflüssen (Chemikalien, Abrieb): bei AFK-Bauteilen kann die Matrix darüber hinaus als Trägermaterial genutzt werden, um einen Lack aufzubringen, der die Fasern vor dem für sie schädigenden UV-Licht schützt,
- Rissstopperfunktion bei Verwendung einer zähen Matrix,



- Krafteinleitung in die Fasern und Kraftüberleitung von Faser zu Faser und
- Stützen der Fasern bei Vorliegen einer Druckbeanspruchung in Faserrichtung.

Da bei Belastung des Faserverbundwerkstoffes die Kraftübertragung mittels Schubkräften von der Matrix auf die Faser stattfindet, ist die Qualität der Haftung entscheidend. Durch gezielte Oberflächenbehandlung oder auf die Matrix abgestimmte -beschichtung der Fasern versucht man diese zu beeinflussen. Die Oberflächenbehandlung soll einerseits eine ausreichende Benetzung der Fasern mit Harz gewährleisten, die den Kraftschluss sicherstellt, andererseits soll sie die Fasern während der Verarbeitung vor Beschädigungen schützen [WEIBBACH (2007)]. Faserabhängig existieren unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung, auf die in den Abschnitte 2.2.1 bis 2.2.4 eingegangen wird. In der Literatur wird von einer sich ausbildenden „Interphase“ zwischen Faser und Matrix ausgegangen, mit der eine möglichst gute Faser-Matrix-Haftung erreicht werden soll [FLEMMING et al. (1999)]. Unterschiedliche Faservolumenanteile im Verbund führen zu verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Fasern, die „*bei der Beurteilung von Schädigungsverläufen in FVW eine große Rolle*“ spielen [LÜTZE (2002)].

2.1.4 Anwendungsbeispiele von Faser-Kunststoff-Verbunden

Die Spannweite der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Faser-Kunststoff-Verbunden sollen die im Folgenden beispielhaft aufgeführten Anwendungen aufzeigen.

Beispielsweise profitieren in CFK-Bauweise hergestellte, elektrisch beheizbare Kunststoffformen von den besonderen Eigenschaften der Verstärkungsfasern. Im Laminat eingebettete Kohlenstofffasern fungieren dabei aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit als Widerstandeleiter zur Beheizung der Formen. Ein aktuelles Forschungsbeispiel beschäftigt sich mit einem Verfahren zum Aufbau solcher beheizbarer Negativformen aus CFK, die der Herstellung von faserverstärkten Kunststoff-Bauteilen dienen. Das beheizbare Kohlenstofffasergewebe (siehe Bild 2.5) kann in Kombination mit unterschiedlichen Matrixwerkstoffen eingesetzt werden. Die kostengünstig herstellbaren CFK-Heizformen sind sehr leicht und wegen der sehr geringen Wärmekapazität energieeffizient. Aufgrund des leicht negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten lassen sich sogar Formen herstellen, die praktisch keinen Verzug aufweisen und somit sehr gut maßhaltig sind. Es werden hohe Aufheiz- und Abkühlraten dadurch erzielt, dass der Strom direkt am Geweberand angeschlossen wird und die Wärme in unmittelbarer Bauteilnähe eingebracht werden kann. Das Gewebe kann so Temperaturen von über 200° C erreichen. Mit solchen Formen, die im Handlaminierverfahren bzw. im Infusionsverfahren hergestellt werden, lassen sich Fertigungskosten von Kunststoffformteilen erheblich reduzieren. [FIBRETEMP (2009-01), FUNKE (2001)]

Die Bremer Firmen Yachtwerft Meyer und Partnerunternehmen Fibretech GmbH wendeten sich mit ihrem Bestreben, eine großflächige Form zur Herstellung von Flugzeug-Innenraumpaneelen aus CFK kostengünstig beheizen zu wollen, an Prof. Dr.-Ing. Herbert Funke von der FH Dortmund. Der Grundstein für diese Verbindung wurde bereits 1996 an der Universität Paderborn mit der Studienarbeit zur elektrischen Beheizung großer Kunststoffformen über integrierte Kohlenstofffasern vom heutigen Fibretech-Geschäftsführer Jens Brandes gelegt [BRANDES/GEBAUER (1996)], die durch den damaligen wissenschaftlichen



Mitarbeiter Herbert Funke betreut wurde. Die darin festgestellten Probleme mit auftretenden Kurzschlüssen und dem Verzug der großflächigen Formschale galt es diesmal in den Griff zu bekommen. Als diese Hürde genommen war, wurden in 2006 erste Innenraumpaneele gefertigt und die Erfindung des Formenbausystems Fibretemp beim Deutschen Patentamt in München zum Patent angemeldet. In Integralbauweise wird die Bauteilform mit den wärmeerzeugenden Komponenten kombiniert, sodass die Wärme dort entsteht, wo sie zum Beheizen der Bauteiloberfläche im Härtingsprozess benötigt wird. Diese Technik wird derzeit von einem Windkraftanlagenhersteller für die Fertigung faserverstärkter Komponenten für Windkraftrotoren eingesetzt. Darüber hinaus wird überlegt, die kompletten Windkraftrotoren mit einer Spannweite von 40 m und über 100 m² Oberfläche auf diese Weise zu fertigen. Die Forschung von Prof. Funke und Co. wurde auf der größten europäischen Verbundwerkstoffmesse JEC 2008 in Paris mit dem JEC-Award für Prozesstechnologie und mit dem Hochschulpreis der Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe (AVK) ausgezeichnet. [SIEBENLIST (2009)]



Bild 2.5: Kohlenstofffasergewebe mit elektrisch leitfähigen Anschlüssen [Bildquelle: FIBRE-TEMP (2009-01)]

Weitere Anwendungsbeispiele sind die einsitzigen Formelrennwagen der FH Dortmund und der Universität Paderborn zur Teilnahme an dem vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) organisierten Motorsportwettbewerb „Formula Student Germany“. Hingebungsvoll designen und tüfteln Studenten dafür an ihrem Rennfahrzeug. Wirtschaftlichkeitskriterien zählen dabei ebenso wie das Einwerben der Finanzierung und die Leistungskriterien des Fahrzeugs selbst. Für den ersten Boliden konstruierte das „Race-Ing“ Team der FH Dortmund nach Teamgründung in 2005 ein Chassis aus GFK. Das in 2006 gegründete UPB Racing Team bestritt die Erstteilnahme mit einer Verkleidung des Formelrennwagens aus Aluminiumblechen mit Kunststoff und GFK. Mittlerweile wird bei beiden Teams bei der Außenverkleidung des Monocoques auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe gesetzt, und deren Einsatz vom UPB Racing Team darüber hinaus auch bei weiteren Profilteilen wie der Doppelquerlenkeraufhängung und der Airbox favorisiert. Das in Bild 2.6 gezeigte Rennteam der Universität Paderborn hat mit seinem Rennwagen „PX 209“ in 2009 die erfolgreichste Rennsaison seit seinem Be-



stehen mit achtbaren Platzierungen in Silverstone (30. von 84), Hockenheim (34. von 78) und dem italienischen Varano de Meleari (22. Platz von 40 teilnehmenden Teams) abgeschlossen [WESTFÄLISCHES VOLKSBLATT PADERBORN (2009), RACE-ING. (-ol), UPBRACINGTEAM (-ol)].



Bild 2.6: Formula Student-Rennteam der Universität Paderborn mit kohlenstoffaserverstärktem Chassis sowie diversen Bauteilen in Kohlenstoffaserverbundbauweise des Rennboliden „PX 209“ [Bildquelle: WESTFÄLISCHES VOLKSBLATT PADERBORN (2009)]

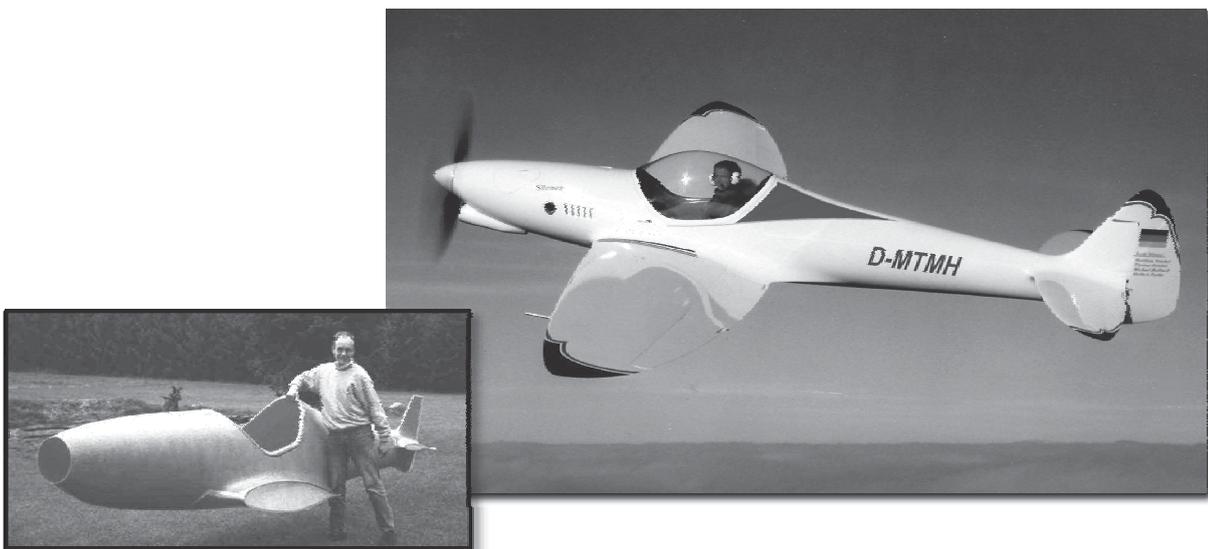


Bild 2.7: UL-Segelflugzeug Silence (rechts), bestehend aus leichtem, gleichzeitig stabilem Wabensandwich-Rumpf mit GFK-Deckhäuten (links) [Bildquelle: FUNKE (2000-2001)]

Seit 1957 kommen Faserverbundwerkstoffe serienmäßig im Segelflugzeugbau zum Einsatz, wo zuvor u. a. „wichtige Pionierarbeiten“ in diesem Bereich geleistet wurde [GÖTZ (2000)].



Häufig werden faserverstärkte Kunststoffverbunde als Deckhäute in Wabensandwichbauweise verwendet, wie beispielsweise bei Ultraleicht-Segelflieger Silence, der in Bild 1.1 und Bild 2.7 zu sehen ist. Als Sandwich bezeichnet man dabei einen Dreischichtverbund, bei dem die dünnen Deckschichten von höherer Festigkeit und höherem E-Modul als die Kernschicht sind [WIEDEMANN (2007)]. So wird eine optimale räumliche Versteifung großflächiger Schalenelemente erzielt [FUNKE (2001)]. Die Kernschicht ist dabei sehr leicht und dient im Wesentlichen als Abstandhalter zwischen den Deckhäuten, die auf diese Weise weit weg von der neutralen Faser angeordnet sind, was ein günstiges Flächenträgheitsmoment und somit einen hohen Widerstand gegen Biegung, Beul- oder Knickgefahr bewirkt. Es entsteht eine stabile Schalenkonstruktion.

2.2 Verstärkungsfasern im Einsatz

Die Verstärkungsfasern übernehmen im Faser-Kunststoff-Verbund im Wesentlichen die Aufgabe, anliegende Lasten zu tragen und haben damit großen Einfluss auf dessen mechanische Eigenschaften. Dafür müssen die Fasern eine hohe Steifigkeit und Festigkeit (vgl. dazu Bild 2.8) aufweisen. Bei den Fasern werden vor allem die Eigenschaften in Faserlängsrichtung genutzt. Die Zugfestigkeiten der einzelnen Verstärkungsfasern übertreffen für sich betrachtet die der metallischen Werkstoffe, bei geringerer Dichte als bspw. der von Aluminium [MICHAELI et al. (1995)].

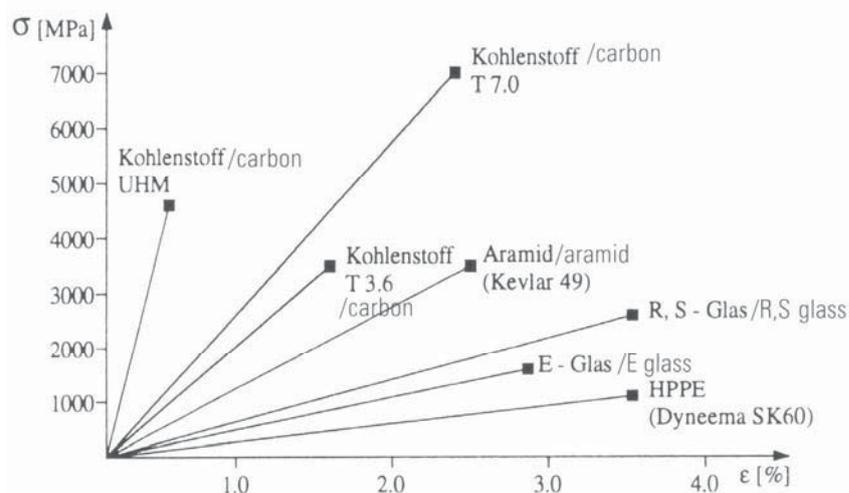


Bild 2.8: Spannungs-Dehnungs-Verhalten ausgewählter Verstärkungsfasern [R&G (2003)]

Der Leichtbaugedanke erfordert weiterhin eine geringe Dichte der Fasermaterialien [SCHÜR-MANN (2007)]. Im Wesentlichen werden diese Anforderungen in der Praxis durch organische (z.B. Aramid, Kohlenstoff) oder anorganische Stoffe (z.B. Glas, Bor) verwirklicht. Des Weiteren existieren Naturfasern (z.B. Baumwolle, Hanf, Sisal) und Metallfasern (z.B. Stahl, Aluminium). [SCHÜR-MANN (2007)]

Ein Grund für die Verwendung eines Werkstoffs in Faserform ergibt sich aus dem so genannten **Paradoxon der Faserform** von A. A. GRIFFITH (1920), welches besagt: „*Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach höhere Festigkeit als das gleiche Material in kompakter Form,*